Über die Helligkeitswerte reiner Lichter bei kurzen Wirkungszeiten.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

vorgelegt der

Hohen medizinischen Fakultät

der

Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau

von

Alfred Zahn
aus Genf.

Leipzig.
Verlag von Johann Ambrosius Barth.
1912.

Gedruckt mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der Universität Freiburg i. B.

Dekan:
Geh. Hofrat Prof. KRASKE.

Referent:
Geheimrat Prof. v. KRIES.

Helligkeitsvergleichungen spektraler Lichter, die sich auf den unmittelbaren Helligkeitseindruck der einzelnen Farben gründen, sind zuerst von Fraunhofer und später von König [1] ausgeführt worden. Die Schwierigkeit und Unsicherheit dieser direkten Ermittlung der „Helligkeitsverteilung im Spektrum“ hat zu einer Reihe verschiedenartiger Verfahrungsweisen der Helligkeitsvergleichung geführt, die sich nach v. Kries [2] in zwei Gruppen scheiden lassen. Die eine umfafst diejenigen Methoden, die sich auf die Unterscheidungsfähigkeiten stützen. Hierher gehören das Verfahren von Vierordt [3], bei dem ein auf den zu untersuchenden Teil des Spektrums projiziertes Vergleichslicht soweit abgeschwächt wird, bis es gerade nicht mehr auf dem Spektrum sichtbar ist, und ferner die auf den Flimmererscheinungen basierenden Methoden, wie sie in verschiedener Form von Rood, Haycraft [4], Rivers [5] und Polimanti [6] angewandt wurden. Das Prinzip der zweiten Gruppe beruht darauf, dafs sie auf Grund besonderer physiologischer Verhältnisse den Wegfall der Farbenempfindung herbeiführt und somit farblose Hellig-

---

[1] König, Helmholtz-Festschrift 1891. S. 350.

[2] v. Kries, Die Gesichtsempfindungen in Nagels Handbuch d. Physiologie III, S. 258.

[3] Vierordt, *Poggendorffs Annalen* **137**, S. 200.

[4] Haycraft, *Journal of Physiol.* **21**, S. 126.

[5] Rivers, *ebenda* **22**, S. 137.

[6] Polimanti, *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* **19**, S. 236.

keiten vergleicht. Damit sind einfachere Bedingungen und weniger vieldeutige Ergebnisse gewährleistet als bei den Verfahren der ersten Gruppe.

Ehe ich auf die hierher gehörigen Methoden im einzelnen eingehe, ist eine für alle hier in Betracht kommenden Feststellungen gültige allgemeine Erwägung vorauszuschicken. Bekanntlich sind „die Helligkeitsverhältnisse verschiedener Lichter in gewaltigem Betrage von dem Adaptationszustande des Sehorgans und der absoluten Intensitätsstufe“ abhängig (v. Kries [1]). Der Helligkeitswert eines Lichtes ist bei Dämmerungssehen (geringe Lichtstärke und dunkeladaptiertes Auge), wobei wie bekannt alle Lichter ohne weiteres farblos erscheinen, ein durchaus anderer als bei Tagessehen (gröfsere Lichtstärke und helladaptiertes Auge).

Hier interessieren in erster Linie die Methoden der Vergleichung farbloser Helligkeiten bei helladaptiertem Auge und die Übereinstimmung ihrer Resultate mit den „direkten“ Ermittlungen von Fraunhofer und König. Es sind dies die Bestimmung der Peripheriewerte von v. Kries [2] und die Minimalfeldhelligkeiten von Siebeck. [3]

Die Peripheriewerte stellen die Helligkeitsverteilung im Spektrum für die total farbenblinde Peripherie der Netzhaut bei helladaptiertem Auge dar.

Die Minimalfeldhelligkeiten entsprechen den Helligkeitswerten spektraler Lichter für parazentrale Netzhautstellen bei Helladaptation. Das Verfahren beruht darauf, dafs farbige Felder von sehr geringer Ausdehnung für die farbentüchtige Umgebung der Fovea centralis farblos erscheinen.

Peripheriewerte, Minimalfeldhelligkeiten und direkt ermittelte Helligkeiten zeigen annähernd dieselbe Verteilung im Spektrum und unterscheiden sich in gleicher Weise von den Dämmerungswerten (Helligkeitsverteilung bei Dämmerungssehen).

Eine weitere Möglichkeit, die Farbenempfindung in Wegfall zu bringen, liegt darin, die Einwirkung eines farbigen Lichtes auf die Netzhaut nicht nur räumlich, sondern vor allem zeitlich möglichst zu beschränken.

---

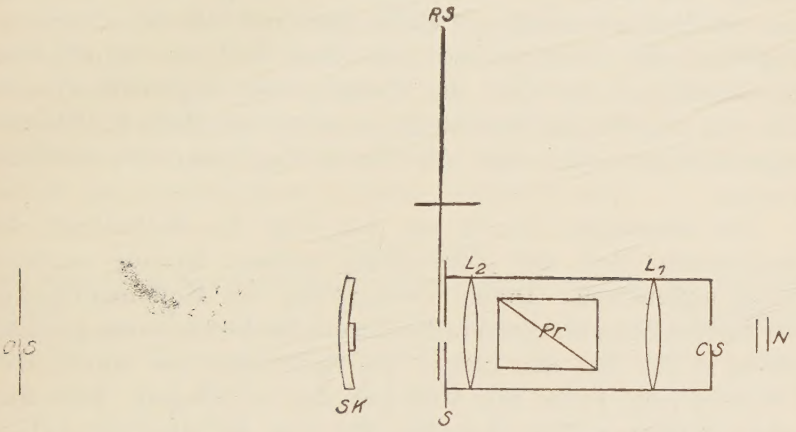
[1] v. Kries a. a. O.

[2] v. Kries, *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* **15**, S. 247.

[3] Siebeck, *ebenda.*

Auf Vorschlag von Herrn Geheimrat v. KRIES habe ich vermittels einer nach diesem Prinzip gestalteten Methode, die ich als die Methode der Minimalzeithelligkeiten bezeichnen möchte, die Helligkeitsverteilung im Spektrum für das helladaptierte Auge untersucht.

Das Verfahren, dessen ich mich bediente, schlofs sich nahe an das von SIEBECK zur Bestimmung der Minimalfeldhelligkeiten verwendete an. Es wurde ebenfalls der geradsichtige Spektralapparat von Schmidt und Haensch benützt (Fig. 1). Kollimator-



Figur 1.

linse L_1, geradsichtiges Prisma P und Objektivlinse L_2 entwarfen in 40 cm Entfernung ein reelles Spektrum, aus dem der Okularspalt OS einen Streifen ausschnitt. Der Collimatorspalt CS wurde durch eine Nernstlampe (N) erleuchtet. Vor der Objektivöffnung war ein weifser Kartonschirm S befestigt, in dessen Mitte sich ein quadratischer Ausschnitt von 2,5 mm Seitenlänge befand. Vor diesem Schirm, und zwar ihm unmittelbar anliegend war eine gröfsere kreisrunde Scheibe RS aus ebendemselben weifsen Karton angebracht, die durch einen Elektromotor in Rotation versetzt werden konnte. Ein in den Stromkreis eingeschalteter Widerstand gestattete die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe passend zu regulieren. Nahe dem Rande der rotierenden Scheibe befand sich ein ebenfalls quadratischer Ausschnitt von 2,5 mm Seitenlänge. Die Öffnungen beider Kartonscheiben konnten vollständig zur Deckung gebracht werden.

Das wesentliche Moment der geschilderten Versuchsanordnung,

wodurch erst das Gelingen der geplanten Untersuchungen ermöglicht wurde, liegt darin, dafs das dem Auge dauernd gebotene weifse Vergleichslicht in bestimmten Intervallen für ganz kurze Zeit in dem der Fovea centralis entsprechenden Gebiete des Gesichtsfeldes unterbrochen und an seiner Stelle das zu untersuchende farbige Licht eingeschaltet wird. Andere Modifikationen der Versuchsaufstellung führten nicht zum Ziel.

Durch Drehung des Kollimatorrohres längs der Skala SK liefsen sich beliebige Stellen des Spektrums im Okularspalt einstellen. Die Skala war in bekannter Weise geaicht worden, indem der Kollimatorspalt der Reihe nach mit Lithium-, Natrium-, Thallium- und Strontiumlicht erleuchtet und die betreffenden Metallinien auf die Mitte des Okularspaltes eingestellt wurden. Aus den zugehörigen Skalenteilen konnten mit Hilfe der Cauchyschen Interpolationsformel alle Lichter des Spektrums bestimmt werden.

Bei rotierender Scheibe sah das Auge des Beobachters das quadratische Feld auf gleichmäfsig weifsem Grunde zunächst farbig aufleuchten. Durch Verengerung des Kollimatorspaltes, was mittels Schnurlaufs vom Platze des Beobachters aus geschah, gelang es für fast alle Lichter des Spektrums bei zentraler Fixation die Farbe zum Verschwinden zu bringen. Eine Ausnahme machte nur das äufserste Rot, das bei einer der weifsen Umgebung entsprechenden Helligkeit stets noch einen Rest von Farbe erkennen liefs. Bei weiterer Verengerung des Spaltes erschien das Feld als dunkler Fleck.

Die Aufgabe bestand nun darin, für jede Farbe bei passender Umlaufsgeschwindigkeit der Scheibe (die für alle Lichter dieselbe blieb) eine Spaltweite zu ermitteln, bei der die Helligkeit des aufblitzenden Feldes derjenigen der Umgebung gerade gleich wurde, das Feld also dauernd unsichtbar blieb.

Der reziproke Wert der Spaltweiten stellt ein Vergleichsmafs für die Helligkeit der verschiedenen Lichter dar.

Die Ermittlung der Helligkeitswerte der einzelnen Farben geschah in folgender Weise. Um möglichst vollkommene Helladaptation zu erzielen, wurde vor jeder Einzelbestimmung das beobachtende Auge etwa eine Minute lang gegen den Himmel gerichtet. Dann wurde möglichst rasch zweimal nacheinander die Spaltweite ermittelt, bei der das farbige Feld unsichtbar wurde und zwar einmal bei abnehmender, das andere Mal bei

zunehmender Spaltweite. Das Mittel dieser oberen und unteren Grenzwerte wurde der Berechnung des Helligkeitswertes zugrunde gelegt. Um von der Inkonstanz des Tageslichtes unabhängig zu sein, wurde jede Einzelbestimmung zwischen zwei Bestimmungen des Na-Lichtes eingeschaltet und nur dann verwertet, wenn die vorausgehenden und nachfolgenden Na-Bestimmungen nicht nennenswert differierten. Die Spaltweite des zu untersuchenden Lichtes wurde dann mit dem arithmetischen Mittel der beiden Na-Bestimmungen verglichen, wobei der Wert des Na-Lichtes = 100 gesetzt wurde.

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 1) enthält die Resultate von fünf Beobachtungsreihen an acht verschiedenen Wellenlängen. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der rotierenden Scheibe war dabei so gewählt, daſs das quadratische Feld alle 1,0 Sek. für die Dauer von ca. $^1/_{500}$ Sek. sichtbar war. Die Beobachtungen fanden bei gewöhnlichem diffusen Tageslicht statt.

Tabelle 1.

Wellenlängen:	659	621	601	589	564	542	523	506	Spaltweiten für 589
	?	74		100	81	56	39	?	6,3— 7,5
	?	83		100	74	60	41	17	5,0— 5,4
	(32?)	78		100	79	55	34	15	6,5— 7,9
	22	83		100	76	63	38	13	6,3— 8,0
	23	77		100	73	63	38	16	5,0— 5,2
			105[1]	100					8,6—10,1
Mittel:	22,5	79,0	105	100	76,6	59,4	38,0	15,2	

Diese Werte sind, wie nochmals hervorgehoben sei, bei zentraler Fixation erhalten. Die Minimalzeithelligkeiten stellen demnach die Helligkeitsverteilung im Spektrum für die Fovea centralis dar. Sie entsprechen annähernd den von Fraunhofer und König direkt ermittelten Helligkeitsverhältnissen und somit auch den Peripheriewerten von v. Kries und den Minimalfeldhelligkeiten von Siebeck. Es war nun von Wichtigkeit festzustellen, wie sich die Helligkeitsverhältnisse der untersuchten Lichter auf den übrigen Abschnitten derselben Netzhaut ver-

[1] Mittel aus 8 Beobachtungen.

hielten. Hierzu eigneten sich am besten die Bestimmung der Minimalfeldhelligkeiten und der Peripheriewerte.

Die Minimalfeldhelligkeiten wurden für eine Feldgröfse von 5′,0 und einem Zentralabstand von 1^0,5 im nasalen Gesichtsfeld ermittelt. Die Peripheriewerte wurden in bekannter Weise bestimmt. In Tabelle 2 sind die erhaltenen Minimalfeldhelligkeiten, in Tabelle 3 die Peripheriewerte wiedergegeben.

Tabelle 2.

Wellenlängen:	659	621	601	589	564	542	523	506	Spaltweiten für 589
	26,5	70,4	104,6	100,0	76,0	57,0	37,4	21,8	13,8—15,3
	23,6	67,6	?	100,0	75,0	61,0	38,3	18,6	12,9—13,8
	23,0	72,7	105,0	100,0	71,3	57,0	36,9	?	18,4—21,8
Mittel:	24,4	70,2	104,8	100,0	74,4	58,3	37,5	20,2	

Tabelle 3.

Wellenlängen:	659	621	601	589	564	542	523	506	Spaltweiten für 589
	21,9	75,0	104,0	100,0	84,0	57,9	38,0	15,0	20,0
	17,3	74,0	96,7	100,0	71,3	51,1	36,8	13,2	15,0—16,5
	26,5	70,8	98,0	100,0	84,6	55,1	35,7	18,3	13,0
Mittel:	21,6	73,9	99,6	100,0	79,9	54,7	36,7	15,2	

Der Übersichtlichkeit wegen habe ich die Durchschnittswerte für Minimalzeithelligkeiten, Minimalfeldhelligkeiten und Peripheriewerten in Tabellen- (Tab. 4) und Kurvenform (Fig. 2) zusammengestellt.

Tabelle 4.

Wellenlängen:	659	621	601	589	564	542	523	506
Minimalzeithelligkeiten:	22,5	79,0	105,0	100,0	76,6	59,4	38,0	15,2
Minimalfeldhelligkeiten:	24,4	70,2	104,8	100,0	74,4	58,3	37,5	20,2
Peripheriewerte:	21,6	73,9	99,6	100,0	79,9	54,7	36,7	15,2

Als wesentliches Ergebnis zeigt sich dabei die auffallende Übereinstimmung der Helligkeitsverteilung im Spektrum für die

verschiedenen Abschnitte der Netzhaut. Die Helligkeitsverhältnisse, in denen die verschiedenen Farben gesehen werden, sind für die Fovea centralis, für ihre Umgebung und für die äufserste Peripherie der Netzhaut dieselben.

Die Feststellung dieser Tatsachen steht in bestem Einklange mit der Annahme von v. KRIES[1], „dafs das physiologische Substrat des exzentrischen farblosen Sehens auch zentral vorhanden sei und hier nur die Träger der farbigen Bestimmungen hinzukommen", woraus weiter zu folgen sein würde, „dafs der Eindruck der Helligkeit in erster Linie durch jenen Bestandteil bestimmt und durch das Hinzukommen der Farben nur unerheblich modifiziert wird."

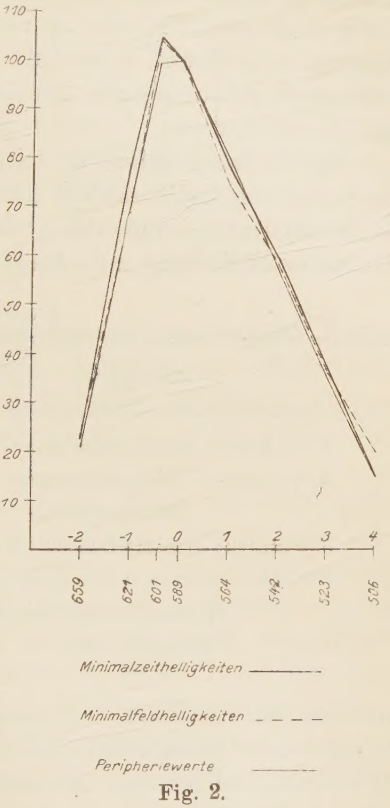


Fig. 2.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Untersuchung bestand in der genaueren Feststellung individueller Differenzen der Helligkeitsverteilung im Spektrum. Zur Orientierung liefsen sich hierzu frühere Untersuchungen über Peripheriewerte und Minimalfeldhelligkeiten in der Weise benützen, dafs das Helligkeitsverhältnis zweier bestimmter Lichter (621 $\mu\mu$: 523 $\mu\mu$) bei verschiedenen Untersuchern verglichen wurde. (Siehe Tab. 5 S. 294.)

Die in Tabelle 5 zusammengestellten Werte lassen recht beträchtliche individuelle Unterschiede erkennen.

Es war nun weiterhin von Interesse zu untersuchen, ob diese persönlichen Differenzen in den Helligkeitswerten der spektralen Lichter in irgendwelcher Beziehung zu den bekannten individuellen Unterschieden der Farbenmischungsgleichungen stehen, wie dies Frl. v. MALTZEW[2] auf Grund ihrer vergleichenden Unter-

[1] v. KRIES, Die Gesichtsempfindungen in NAGELS Handb. d. Physiol. Bd. III, S. 259.

[2] *Zeitschr. f. Sinnesphysiol.* **43**, S. 76. 1909.

suchungen „über individuelle Verschiedenheit der Helligkeitsverteilung im Spektrum“ vermutet hat. Frl. v. Maltzew bediente sich zur Ermittlung der Helligkeitsverteilung der Flimmermethode von Polimanti und kam zu dem Ergebnis, dafs diejenigen Beobachter, die in der Rayleigh-Gleichung verhältnismäfsig viel Grün einstellen, dem Grün auch eine gröfsere Intensität geben müssen, um es einem bestimmten Rot flimmergleich zu machen.

Es mufsten daher an einer Reihe von Personen Parallelversuche angestellt werden, die einmal die Ermittlung der Helligkeitsverhältnisse und dann die Herstellung der sogenannten Rayleigh-Gleichung zum Gegenstand hatten. Es wäre nun zu

Tabelle 5.

Beobachter	621 $\mu\mu$	523 $\mu\mu$
1. v. Kries: Peripheriewerte	3,7	1
2. Polimanti: Peripheriewerte	2,5	1
(Flimmerwerte	2,7	1)
3. Siebeck: Minimalfeldhelligkeiten	5,3	1
4. Zahn: Minimalzeithelligkeiten	2,1	1
Minimalfeldhelligkeiten	1,9	1
Peripheriewerte	2,1	1

umständlich gewesen, für jeden Beobachter eine vollständige Kurve der Helligkeitsverteilung vermittels der Methode der Minimalzeithelligkeiten aufzustellen. Es konnte auch hier genügen, das Verhältnis zweier Lichter zu vergleichen.

Die oben beschriebene Versuchsanordnung wurde daher in folgender Weise abgeändert[1]: Die Öffnung der Scheiben S und RS wurden durch zwei übereinander liegende quadratische Ausschnitte von 2,5 mm Seitenlänge ersetzt, deren Abstand ebenfalls 2,5 mm betrug. Die Achse der rotierenden Scheibe RS war so gestellt, dafs die beiden Felder gleichzeitig und gleich lang erleuchtet erschienen. Hinter der unteren Öffnung des Schirmes S war ein ablenkendes Prisma mit einem brechenden Winkel von 2^0 angebracht. Um eine Verstaubung des Prismas zu vermeiden,

[1] Das Prinzip dieser Modifikation wurde in ähnlicher Weise von M. Böhm, *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* **42**, S. 155 benützt.

wurden die Felder des Schirmes *S* mit einem Deckglas bedeckt, das durch die rotierende Scheibe stets blank gehalten wurde.

In der Ebene des Okularspaltes wurden nun zwei gegeneinander verschobene Spektren entworfen; die beiden Felder waren von verschiedenen Lichtern erhellt, deren spektraler Abstand konstant blieb. Aus der Kurve der Helligkeitsverteilung geht hervor, dafs bei passend gewähltem Abstand sich für jeden Beobachter zwei Farben einstellen lassen, die gleichen Helligkeitswert besitzen. Individuelle Verschiedenheiten der Helligkeitsverteilung werden sich daher in der Weise dokumentieren, dafs die einzelnen Beobachter verschiedene Einstellungen liefern und andererseits ihre „Helligkeitsgleichungen" gegenseitig nicht anerkennen werden.

Zur Ermöglichung einer präzisen Einstellung blieb bei dieser Anordnung das Kollimatorrohr fest, während der Okularspalt auf einem durch Tangentenschraube bewegten metallenen Träger angebracht war. Die Verschiebung wurde an einer Skala mit Nonius abgelesen.

Bei rotierender Scheibe und passender Weite des Kollimatorspaltes sah der Beobachter die beiden Felder zunächst als ungleich helle, farblose Lichtflecke aufblitzen. Bei Verschiebung des Okularspaltes nach dem roten Ende des Spektrums wurde das langwellige Licht dunkler, das kurzwellige heller, umgekehrt bei Verschiebung in entgegengesetzter Richtung. Es fiel nun auch dem Ungeübten verhältnismäfsig leicht, eine Einstellung zu finden, bei der beide Felder gleich hell aufblitzten oder, genauer ausgedrückt, gleichen Kontrast mit der Umgebung aufwiesen. Als Fehlerquelle machte sich anfangs der Umstand störend bemerkbar, dafs der Beobachter geneigt war, die beiden Felder einzeln nacheinander zu fixieren, wobei das jeweils fixierte stets zu hell erschien. Es wurde daher in etwa 2 cm Entfernung vor der rotierenden Scheibe als Fixationsmarke ein schräges Fadenkreuz in der Weise angebracht, dafs sein Schnittpunkt sich in der Mitte zwischen den beiden Feldern befand und diese selbst symmetrisch zur Kreuzfigur zu liegen kamen.

Um die Brauchbarkeit der Methode zu Vergleichszwecken bewerten zu können, war es nötig, den mittleren Fehler der einzelnen Einstellung zu bestimmen. Er betrug nach längerer Übung für mich 0,091 Skalenteile oder, in Wellenlängen ausgedrückt, ca. 1,3 $\mu\mu$. Für die Parallelversuche war natürlich die

Gröfse des mittleren Fehlers bei Ungeübten mafsgebend. Die Werte schwankten hier zwischen 0,1—0,2 Skalenteilen, was etwa 1,3—2,6 $\mu\mu$ entspricht. In den ausgesprochenen Fällen von individuellen Verschiedenheiten machten die Differenzen der Einstellung das vier- bis siebenfache dieser Werte aus. Die Realität einer individuellen Differenz der Helligkeitsverteilung kam in diesen Fällen auch subjektiv besonders deutlich darin zum Ausdruck, dafs die Einstellungen des einen Beobachters von dem anderen stets mit voller Entschiedenheit, und zwar immer in demselben Sinne als falsch bezeichnet wurden.

Über die Ausführung der Parallelversuche im einzelnen ist noch folgendes zu bemerken. Die beiden Beobachter nahmen abwechselnd eine Einstellung vor und machten sich dabei Notizen über die „Richtigkeit" der vorausgegangenen Gleichung des Parallelbeobachters, ohne jedoch dessen Einstellung zahlenmäfsig zu kennen. In der Regel wurden 5—7 solcher Beobachtungen angestellt.

An diese Helligkeitsgleichungen wurde meist sofort die Herstellung der Rayleigh-Gleichungen am Helmholtzschen Farbenmischapparat angeschlossen. Das eine Kollimatorrohr lieferte das Vergleichlicht (Natriumlicht), das andere gestattete eine Rot-Grünmischung aus den Wellenlängen 670,8 (Lithium) und 534,9 (Thallium). Das Mengenverhältnis der Mischungslichter wird bekanntlich durch Drehung des Nikols verändert und ist den Tangensquadraten der Nikolstellungen proportional. Auch hier wurden die Einstellungen von beiden Beobachtern in entsprechender Weise wie bei den Helligkeitsgleichungen vorgenommen. In einigen Fällen wurde die Rayleigh-Gleichung am Nagelschen Anomaloskop ausgeführt.

Die Resultate der Parallelversuche sind in den Tabellen 6 und 7 enthalten.

In Tabelle 6 bedeutet *Sk* den eingestellten Skalenteil, der nächste Stab enthält die ihm entsprechenden Wellenlängen. Der Stab: *Sk*-Diff. gibt die Differenz der Einstellungen beider Beobachter in Skalenteilen an. α bzw. $tg^2\alpha$ bedeutet die Winkelstellung des Nikolschen Prismas bzw. das Tangensquadrat dieses Winkels. Die beiden letzten Stäbe endlich enthalten die Einstellungen am Anomaloskop.

Tabelle 7 gibt eine zusammenfassende Übersicht der wesentlichen Ergebnisse.

Tabelle 6.

Helligkeitsgleichung					Rayleigh-Gleichung				Anomaloskop	
Sk	*μμ*	*Sk*	*μμ*	*Sk*-Diff.	α	$tg^2\alpha$	α	$tg^2\alpha$		
1. Mo.		**Z.**			**Mo.**		**Z.**		Mo.	Z.
2,84	627,7 : 567,0	2,94	629,2 : 568,0	0,10	31,1	0,36	32,1	0,39	60,8	60,5
2,88	628,3 : 567,5	2,93	629,1 : 567,9	0,05	29,5	0,32	32,2	0,39		
2,76	626,6 : 566,3	2,93	628,9 : 567,8	0,17						
2. H.		**Z.**			**H.**		**Z.**			
2,95	629,3 : 568,1	3,02	630,3 : 568,8	0,07	30,0	0,33	31,5	0,37		
3,05	630,8 : 569,1	2,89	628,7 : 567,6	—0,16						
3. T.		**Z.**			**T.**		**Z.**		T.	Z.
3,92	644,1 : 577,2	3,01	630,2 : 568,7	—0,91	31,7	0,38	32,1	0,39	59,02	59,20
					32,6	0,41	33,8	0,45		
4. G.		**Z.**			**G.**		**Z.**			
2,62	624,9 : 564,2	2,85	628,0 : 567,1	0,23	31,7	0,38	33,8	0,45		
2,80	627,2 : 566,6	3,11	631,8 : 569,6	0,31						
5. E.		**Z.**			**E.**		**Z.**		E.	Z.
3,49	637,5 : 573,2	2,99	630,0 : 568,4	—0,50	28,8	0,29	33,3	0,43	62,7	60,3
3,34	635,2 :	2,83	627,6 : 567,0	—0,51						
6. K.		**Z.**			**K.**		**Z.**		K.	Z.
3,80	642,2 : 576,0	3,07	630,6 : 569,6	—0,73					62,0	60,5
3,80	642,2 : 576,0	2,98	629,8 : 568,3	—0,82					62,3	59,4
7. W.		**Z.**			**W.**		**Z.**		W.	Z.
3,86	643,2 : 576,6	3,10	631,6 : 569,5	—0,76					63,0	60,0
8. L.		**Z.**			**L.**		**Z.**			
3,10	631,6 : 569,5	3,20	633,1 : 570,4	0,10	28,7	0,29	30,0	0,34		
9. M.		**Z.**			**M.**		**Z.**			
2,97	629,7 : 568,3	3,11	631,8 : 569,6	0,14	35,6	0,52	36,8	0,56[1]		
					33,7	0,44	34,4	0,46[1]		
10. P.		**Z.**			**P.**		**Z.**			
3,71	639,8 : 575,2	2,87	628,2 : 567,3	—0,84	36,5	0,55	36,4	0,55[1]		
3,91	643,9 : 577,1	2,95	629,4 : 568,1	—0,96						
3,75	641,4 : 575,6	2,96	629,6 : 568,2	—0,79						

[1] Keine Rayleigh-Lichter.

Tabelle 7.

Beobachter	Sk Helligkeitsgleichung Differenz der Skalenteile gegenüber Zahn	n Rayleigh-Gleichung $\frac{tg^2\alpha \text{ Zahn}}{tg^2\alpha \text{ Beobachter}}$
1. Mo.	+ 0,11	1,14
2. H.	— 0,09	1,12
3. Tr.	— 0,91	1,06
4. G.	+ 0,27	1,18
5. E.	— 0,51	1,48
6. K.	— 0,77	(1,48)[1]
7. W.	— 0,71	(1,48)[1]
8. L.	+ 0,10	1,17
9. M.	+ 0,14	1,01
10. P.	— 0,86	1,00

Zur Erläuterung dieser Tabelle ist folgendes zu bemerken:

Die positiven Werte der Skalenteildifferenzen (Sk) entsprechen einem kleineren Helligkeitswert der roten Lichter für den Parallelbeobachter gegenüber Zahn.

Die die Einheit übertreffenden Werte des Verhältnisses

$$n = \frac{tg^2\alpha \text{ Zahn}}{tg^2\alpha \text{ Beobachter}}$$

entsprechen einem gröfseren Anteil der Rotkomponente in der Rot-Grünmischung des Parallelbeobachters gegenüber Zahn.

Nach der vorhin erwähnten von Frl. v. Maltzew ausgesprochenen Vermutung sollten die positiven Werte von Sk mit den die Einheit übertreffenden des Bruches n verknüpft sein.

Ein Vergleich dieser Zahlen läfst jedoch ohne weiteres erkennen, dafs von einer gesetzmäfsigen Beziehung zwischen den individuellen Differenzen der Helligkeitsverteilung und denjenigen der Farbenmischungsgleichungen nicht die Rede sein kann. Es finden sich bei den verschiedenen Beobachtern ganz regellos bei relativ hohen Helligkeitswerten der roten Lichter (gegenüber Zahn) sowohl höhere wie niedere Werte der Rotkomponente in der Rot-Grünmischung. Namentlich darf darauf aufmerksam gemacht werden, dafs der höchste Wert von n 1,48 bei einem

[1] nach Einstellung am Anomaloskop berechnet.

Beobachter auftritt, für den Sk negativ ist. Andererseits ist zu beachten, dafs der stärkste negative Wert von Sk sich bei einem Beobachter findet, für den n nicht nennenswert von 1 verschieden ist. Gerade das letztere Ergebnis darf, weil es sich auf einen physiologisch geschulten Beobachter bezieht, als besonders zuverlässig hervorgehoben werden.

Da es wünschenswert erschien, den Einflufs der Absorption in der Macula lutea zu verringern, so wurden bei einigen Beobachtern noch Farbengleichungen aus den Lichtern 670,8 $\mu\mu$ und 560 $\mu\mu$ hergestellt. (Tab. 8.)

Tabelle 8.

Beobachter	Rayleigh-Gleichung			Helligkeitsgleichung Differenz der Skalenteile gegenüber Zahn
	α	$tg^2\alpha$	$\frac{tg^2\alpha \text{ Zahn}}{tg^2\alpha \text{ Beobachter}}$	
Zahn	44,4	0,98	—	
G.	44,4	0,98	1,00	+ 0,27
Tr.	44,8	0,99	0,99	— 0,91
M.	43,7	0,92	1,06	+ 0,14

Eine Änderung der oben geschilderten Ergebnisse war damit nicht verbunden. Auch unter diesen Bedingungen schienen die Farbenmischungsgleichungen völlig unabhängig von den individuellen Differenzen der Helligkeitsverteilung.

Theoretische Erörterungen an diese Befunde anzuknüpfen, kann an dieser Stelle unterbleiben.

Es sei nur gestattet, auf die Ergebnisse derjenigen Verfahren der Helligkeitsvergleichung hinzuweisen, die als Methoden der Unterscheidungsfähigkeiten charakterisiert wurden. Die Resultate dieser Verfahrungsweisen zeigen nämlich mit den Ergebnissen der Vergleichung farbloser Helligkeiten eine annähernde Übereinstimmung. Der Nachweis individueller Verschiedenheiten der Helligkeitsverteilung legt den Gedanken nahe, dafs die Differenzen in den Resultaten beider Gruppen von Methoden eben durch individuelle Unterschiede bedingt sein könnten. Diese Erwägung ist aber identisch mit der Frage, ob „bei allen jenen Verfahrungsweisen die nämliche physiologische Beziehung mafsgebend ist“ (v. Kries[1]). Es dürfte sich daher wohl verlohnen,

[1] v. Kries, Die Gesichtsempfindungen in Nagels Handbuch d. Physiol. III, S. 260.

die Helligkeitsverteilung im Spektrum mit Methoden beider Gruppen für ein und dieselbe Netzhaut zu bestimmen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen lassen sich in folgendem zusammenfassen:

Durch Beschränkung der Einwirkung spektraler Lichter auf die Netzhaut auf geringste Zeiten läfst sich die Farbenempfindung bei helladaptiertem Auge für die Fovea centralis in Wegfall bringen.

Die nach dieser Methode ermittelte Helligkeitsverteilung im Spektrum — Methode der Minimalzeithelligkeiten — stimmt nahezu mit den Peripheriewerten von v. Kries, den Minimalfeldhelligkeiten Siebecks und annähernd auch den direkten Helligkeitsvergleichungen von Fraunhofer und König überein.

Für ein und dieselbe Netzhaut zeigen die Kurven der Minimalzeithelligkeiten, der Minimalfeldhelligkeiten und der Peripheriewerte fast genau denselben Verlauf. Die Helligkeitsverteilung im Spektrum ist demnach in der Fovea centralis, in ihrer Umgebung (parazentral) und in der äufsersten Peripherie der Netzhaut dieselbe.

Vergleichende Untersuchungen an einer Reihe von Personen haben deutlich nachweisbare individuelle Differenzen der Helligkeitsverteilung ergeben.

Eine Abhängigkeit dieser Differenzen von den individuellen Unterschieden der Farbenmischung (Rayleigh-Gleichung) besteht nicht.

Herrn Geheimrat v. Kries spreche ich für die Anregung zu diesen Versuchen und die vielfache Unterstützung während derselben meinen aufrichtigen Dank aus. Ebenso sage ich allen Herren, die mich bei der Anstellung der Parallelversuche in liebenswürdigster Weise unterstützten, meinen besten Dank.

Lebenslauf.

Ich, Alfred Otto Wilhelm Zahn, wurde geboren am 31. Januar 1886 in Genf als Sohn des verstorbenen Professors der Pathologie Friedrich Wilhelm Zahn. Ich besuchte und absolvierte das humanistische Progymnasium Bergzabern i. d. Pfalz und das Gymnasium Landau i. d. Pfalz und studierte an den Universitäten Gießen, München und Freiburg i. B. Medizin. In Freiburg bestand ich im Frühjahre 1907 die ärztliche Vorprüfung und im Frühjahre 1910 das medizinische Staatsexamen. Meiner Militärpflicht genügte ich als Einj.-Freiwilliger mit der Waffe beim 5. Bad. Infanterie-Reg. Nr. 113 (Freiburg i. B.) und als einj.-freiw. Arzt beim 5. Bad. Feldartillerie-Reg. Nr. 76 (Freiburg i. B.) sowie beim Kurmärkischen Dragoner-Reg. Nr. 14 (Colmar i. E.).

G. Pätz'sche Buchdr. Lippert & Co. G. m. b. H., Naumburg a. d. S.